

Sekélyvizű tavak vízminőség-vizsgálata, állapotfelmérése műholdas távérzékelés segítségével

Sváb Emese

Doktori (Ph. D) értekezés tézisei

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar

Földtudományi Doktori Iskola
Vezetője: Dr. Monostori Miklós, D.Sc, egyetemi tanár

Térképész Doktori Program
Programvezető: Dr. Klinghammer István, CMHAS, egyetemi tanár



Témavezető: Dr. Zentai László, D.Sc, egyetemi tanár
ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék
Budapest
2008

1. Bevezetés

A víz minősége hatással van felszínének fényvisszaverő képességére (Gitelson *et al.* 1993, Han *et al.* 1996, Quibell 1991), ezért alkalmas a távérzékeléses módszerrel – több hullámhossz-tartományban – készített kép a vízminőség ellenőrzésére. A vizsgálandó vízfelület minden képi pontjára vonatkozóan adatot nyerhetünk, s ez a lehetőség alkalmassá teszi, pl. a műholdképet, olyan nagy kiterjedésű tavak egyidejű felmérésére, mint a közel 600 km² területű Balaton. Ilyen jellegű térbeli információt a hagyományos mintavételezési módszerekkel nem lehet előállítani.

Az egyes hullámhossz-tartományokban a műhold rögzíti a felszínről – ebben az esetben a Balatonról – visszavert sugárzást. Az így nyert intenzitás-értékek azonban nem hozhatók közvetlen összefüggésbe a felvételezés idején fennálló vízminőséggel. Ezért a képek kiértékelése a hagyományos módszerekkel nyert terepi alapadatokra támaszkodva matematikai, statisztikai módszerek alkalmazásával történik.

Alacsony lebegőanyag tartalommal jellemezhető tavak esetében (pl. Garda-tó) már kialakítottak olyan megbízható eljárást, amellyel térképezni lehet az a-klorofill-töménységet (Brivio *et al.* 2001). A heterogén eloszlású, magas lebegőanyag tartalommal jellemezhető sekély vizű tavak esetén (pl. Balaton) ezek az eljárások nem hoznak eredményt, ugyanis a lebegőanyag reflektanciája elfedi az a-klorofillról érkezőt.

A szakirodalom szerint a durva spektrális felbontással rendelkező műholdképek (pl. Landsat) alapján nem lehetséges az olyan vízminőségi jellemzők szétválasztása, mint a lebegőanyag-tartalom és az a-klorofill-koncentráció, különösen eutróf vizek esetében (Dekker *et al.* 1995, Lindell *et al.* 1999).

2. Célkitűzések

Olyan összefüggésrendszer kialakítását tűztem ki célul, mely segítségével megrajzolható egy sekélyvizű tó, a Balaton, adott időpontra vonatkozó vízminőségi térképsorozata. A kialakított módszert alkalmazni kívántam korábban készült, a Balatont ábrázoló felvételek értékelésére is. Olyan rendszer kialakítására törekedtem, amely egyrészt költséghatékony, másrészt megbízhatóan alkalmazható más sekélyvizű tavak vízminőségi vizsgálata esetén is.

A vizsgálatok eredménye tematikus térképek sorozata, amelyek információtartalma sokkal nagyobb, minthogy azokat változtatás nélkül a térképolvasó közönség elé lehetne

nyomatott formában tární. A térképi információ közlésének körülményei és lehetőségei szerint változott a generalizálás foka és minősége.

3. Alkalmazott módszerek

A mintaterület kiválasztásánál szempont volt, hogy rendelkezésre álljon róla minél szélesebb körben az elmúlt évekre, évtizedekre hagyományos módon gyűjtött vízminőségi adat. Ennek érdekében a balatoni mintaterület kiválasztásához elsősorban a Balatoni Limnológiai Kutatóintézet (BLKI) vízminőségi adatbázisára támaszkodhattam.

A Balaton vízminősége az 1970-es évek közepe óta folyamatosan romlott. A problémát a Kis-Balaton védőrendszer kialakítása sem szüntette meg, annak üzembe helyezését követően is előfordultak vízvirágzások (pl. 1994). A Balaton vizének állapotát meghatározó folyamatok megértéséhez szolgáltatt további információt a távérzékeléses adatok alapján készített részletes vízminőségterkép.

A Balatonon korábban már történt próbálkozás a vízminőség távérzékelésen alapuló meghatározására. Ezek a vizsgálatok az 1970-es évek végén indultak, és 1991-ben véget értek (pl. Varga *et al.* 1991). Kutatásaik során gyűjtött tapasztalataik értékesek, ám nem sikerült megbízható eljárást kidolgozniuk az a-klorofill-tartalom kimutatására.

A kutatás során választott statisztikai módszer hatékonyságának ellenőrzésére a műholdképek elemzése előtt kísérletsorozatra került sor. Durva falú fekete medencében levő Balaton víz fényvisszaverésének vizsgálata spektrométer segítségével történt. Rögzítésre került a reflektancia változása különböző ismert mennyiségű lebegőanyagot (száritott, majd porrá őrölt fenékküledéket), ill. algatenyészetet tartalmazó víz esetén.

A kísérleteket a Zala torkolatánál gyűjtött, a látható fényt szinte teljesen elnyelő huminanyagokban gazdag vízzel is megismételve az adódott, hogy a fénymenetek hasonlóak voltak a „tisztá” Balaton vízzel végzett kísérletekhez. A vizsgálatok eredményeit hasonló elemzéseknek vetette alá – főkomponens-analízis (PCA) –, mint a képek intenzitásértékeit. Megállapítható volt, hogy a vízben lévő a-klorofill és lebegőanyag megfelelően egyedi spektrális tulajdonságokkal rendelkeznek.

A Landsat műholdak évtizedek óta megbízhatóan, rendszeresen készítik a felvételeket, és megfelelő archívum áll a felhasználók rendelkezésére. Költségek tekintetében is előnyt élveznek, pl. a hiperspektrális légi felvételezéssel szemben, ezért Landsat felvételek szolgálták a vízminőségi elemzés alapját. A Landsat műholdak által készített képek hátránya, hogy durva spektrális felbontással rendelkeznek, és a sávok kiosztása is elsősorban a szárazföldi felszín megfigyelését szolgálja.

A műholdképek készültével párhuzamosan több alkalommal terepi mérésekre került sor, melyek a vízminta-vételből, és a vízminták hagyományos vízkémiai elemzéséből álltak (BLKI laboratóriumaiban). A víz reflektanciáját ugyanakkor spektrométer rögzítette.

A nyers képek az előkészítés folyamán váltak alkalmassá a vizsgálatokra. A műholdról érkező képi adat radiometriai-, geometriai- és légköri korrekció után a térképi vetületi rendszerbe való illesztés és a vízzel borított felületekhez tartozó képpontok leválogatása által vált a vízminőségi adatok kinyerésére alkalmas felvétellé. Az eredmény vetületi rendszerbe illesztett, a légkör torzító hatásától mentesített, egymással összehasonlítható állapotba hozott képek sorozata lett.

A mért vízminőségi jellemzők és az előkészített műholdképeken, a mintavétel helyén tapasztalt intenzitás értékek összevetése kimutatta, hogy az összes vizsgált időpontban szignifikáns a korreláció a lebegőanyag-tartalom és a 3. Landsat sáv között ($r^2=0,89$). A regressziós együtthatók segítségével elkészíthető volt az egyenlet, amellyel később olyan képek esetében is térképezni lehetett a lebegőanyag-tartalmat, amikor a műholdátvonulással párhuzamosan terepi mintavételezés nem történt.

Egyéb vizsgált vízminőségi jellemzővel, pl. a-klorofill nem mutatkozott minden időpontra jellemző szoros szignifikáns korrelációt. Ez az eredmény várható volt a korábban sejtelt tavakon végzett vizsgálatok (pl. Varga *et al.* 1991) alapján.

Tanulmányok bizonyították (pl. van der Meer 1995), hogy a „lágy” (soft) képelemzési módszer, amely lehetővé teszi bizonyos mennyiségek képponton belüli változékonyságának becslését, kvantitatív eredménnyel képes szolgálni oly módon, ha előbb regresszió vagy többváltozós regresszió segítségével kalibráltunk. A már megszokott módszerekkel kivitelezhetetlennek ítélt feladatot ilyen új megközelítésbe helyezve lehetett vizsgálni.

A választott „lágy” osztályozási módszer a lineáris szétválasztás (linear mixture modelling) volt, mely szerint minden képpont intenzitás-értéke az azt felépítő felszínfélésegekről (komponensről) érkező reflektanciák összegeként értelmezhető, azok aránya szerint. Azoknak a komponensnek – ebben az esetben a lebegőanyag és a-klorofill – szétválasztása lehetséges, amelyek egyedi spektrális tulajdonságokkal rendelkeznek.

Az alkalmazott eljárás a következő volt. Az előkészített Landsat képek jel-zaj arányát maximalizálását és információ-sűrítést kellett elvégezni továbbfejlesztett főkomponens számításával (Minimum Noise Fraction, MNF). A keletkezett új vektortérben a képi adatok pontfelhőjéből lehetett leválogatni azokat a szélső pontokat (end-member), amelyek többnyire egy vízminőségi tulajdonság jellemzői: a magas lebegőanyag-tartalom, a tiszta ülepített víz, a magas a-klorofill-tartalom, valamint a magas lebegőanyag- és az a-klorofill-töménység. Az

MNF-transzformáció megmutatta az is, hogy a feldolgozásra szánt Landsat képek a lineáris szétválasztáshoz megfelelő spektrális dimenzionáltsággal rendelkeztek. A négy szélső pont alapján végrehajtott „korlátozás nélküli” spektrális szétválasztás (unconstrained spectral unmixing) eredménye négy eloszlástérkép volt, ahol az adott képpont az adott szélső ponthoz való tartozás mértékét tükrözte. Az eloszlástérképek kalibrálása a hagyományos technikával mért vízminőségi adatokhoz először regresszió, majd többváltozós regresszió segítségével történt.

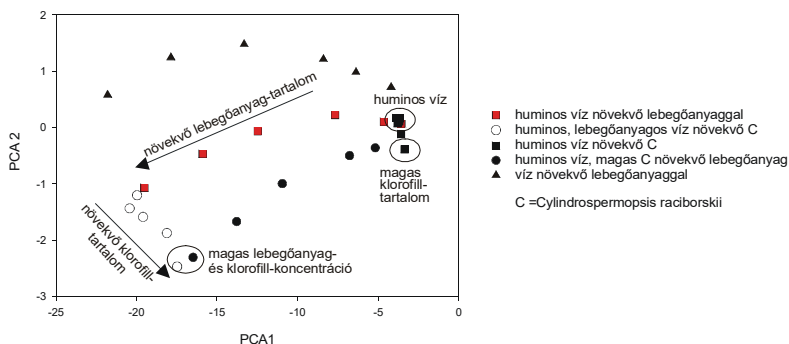
A vizsgálati időszakban készült Landsat műholdképek lineáris szétválasztása után a módszer egy korábban (1994. július 25.) készült Landsat kép elemzésére alkalmasnak bizonyult. A rendelkezésre álló a-klorofill-értékek az ellenőrzéskor kerültek felhasználásra.

A vizsgálatok eredményeit tematikus térképsorozat ábrázolja. A térképek nagyfokú generalizálására volt szükség ahhoz, hogy az eredményeket be lehessen mutatni, például szürke fokozatos térképeken.

4. Tézisek

1. Medencekísérletek során igazoltam, hogy a különböző vízminőségi jellegekkel rendelkező vizek fényviszszaverése spektrálisan megfelelően eltér egymástól, és ez megteremtette a lehetőséget sekélyvizű tavak vízminőség-vizsgálatára, állapotfelmérésére műholdas távérzékelés segítségével.

Azokat a fénymeneteket, amelyeket a medencekísérletek Zala torkolatánál gyűjtött, huminanyagokban gazdag vizével végeztem főkomponens analízisnek vetettem alá. A keletkezett új vektortérben, az első és második komponens függvényében, jól látszott, hogy különböző helyen jelenik meg a magas lebegőanyag-tartalmú, a tiszta ülepített, a magas a-klorofill-tartalmú, valamint a magas lebegőanyag- és a-klorofill-töménységű Balaton víz. Ez azt jelentette, hogy a képpontokat felépítő komponensek spektrálisan jól elkülönülnek egymástól (1. ábra).



1. ábra. A huminanyagokban gazdag vízzel végzett medencekísérletek eredményei főkomponens analízis után, az első (PCA1) és a második (PCA2) komponens függvényében.

Azt feltételeztem, hogy a Balaton felszínéről visszavert, a műhold által érzékelt, sugárzás alapján ugyanígy el lehet majd különíteni az eltérő minőségű vizeket.

2. Egyenletet alakítottam ki a lebegőanyag térképezésére Landsat képek alapján, melyben szoros, szignifikáns korreláció adódott a 3. Landsat sáv és a lebegőanyag-tartalom között.

Annak érdekében, hogy egyetlen egyenletet kapjunk az 1999. júniusi és 2000. augusztusi adatokat együtt vizsgáltuk. Független regresszió analízis bizonyította a regresszió koefficiensének konzisztenciáját, mutatva ezzel, hogy az alkalmazott atmoszférikus korrekció és a képek egymáshoz való igazítása megbízható. Az egyesített adatok determinációs együtthatója: $r^2=0,891$ és a regressziós koefficiensek a következők:

$$SSC = -2,44 + 1,36 \cdot DN_{B3} \quad (1)$$

ahol

SSC lebegőanyag-tartalom [$mg \cdot l^{-1}$],

DN_{B3} az előkészített Landsat kép 3. sávjának intenzitás értéke (digital number).

Az egyenlet segítségével minden olyan kép esetében ki lehet számítani az aktuális lebegőanyag-tartalmat, amelyhez helyszíni mintavételi expedíció a műhold átvonulásának napján nem csatlakozott. Az ilyen pillanatnyi lebegőanyag térkép nélkülözhetetlen alapanyaga a végtagok (end-members) kiválasztásának.

A többi vizsgált vízminőségi jellemző és a Landsat sávok között nem találtam a három vizsgált időpontban egyezően szoros korrelációt. Így regressziós egyenletek segítségével nem volt lehetséges ezek térképezése.

3. Egyenletet állítottam fel a Balaton vizének a-klorofill-tartalmának megállapítására Landsat műholdkép alapján.

A műholdképeket a „lágy” osztályozási technikák közé tartozó lineáris szétválasztással (Linear Spectral Unmixing) elemeztem. Abban az esetben tudtam többváltozós regresszió segítségével kapcsolatot teremteni a hagyományos vízminőségi adatok és a szétválasztás eredményeként létrejövő eloszlások között, amikor az a-klorofill-tartalom meghaladta a $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t. Az a-klorofill térkép előállításához nem volt szükség mind a négy előzetesen megállapított szélső pontra.

A többváltozós regresszió a 2000. szeptember 11-én készült Landsat műholdképen alapulva a következő:

$$Chla = 72 - 57,8 \cdot EM_3 + 277 \cdot EM_4 + 56,6 \cdot EM_1 \quad (2)$$

ahol

$Chla$ az adott képponton a-klorofill-tartalom [$\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$],

EM_3 a magas lebegőanyag tartalom,

EM_4 a magas a-klorofill,

EM_1 a tiszta víz relatív eloszlástérképen vett értéke.

A Balatonon, és az azt körülvevő tavakban az a-klorofill mennyiségének megállapítása az MNF-transzformációt követően az egyenletben szereplő szélső pontok meghatározásán múlik.

4. A kialakított módszert egy korábban (1994. július 25-én) készült Landsat TM képre alkalmazva igazoltam annak helyességét, használhatóságát. A megfelelően előkészített műholdkép alapján elkészítettem a lebegőanyag eloszlásának tematikus térképét az (1) egyenlet felhasználásával. Ezt követte a spektrális szétválasztás folyamata. A három domináns szélső pontot felhasználva, azok eloszlástérképén alapulva alkalmaztam a (2) egyenletet. Igen szoros egyezést kaptam a számított és mért a-klorofill-mennyiségek között.

5. Térképsorozatot készítettem a tudományos eredmények bemutatására. A közlési lehetőségek figyelembevételével választottam meg az ábrázolás módját (színárnyalatok, szürkefokozatok száma). A tematikus térképek információtartalmát térképi generalizálással tettem optimálissá.

5. Következtetések

A lebegőanyag eloszlásának térképezése könnyen kivitelezhető Landsat képek alapján, annak 3. sávja segítségével. A sáv kalibrálásának pontossága nagyban függ az aktuális szélviszonyoktól, mivel a lebegőanyag-koncentrációja térben és időben nagy változásokat mutathat, különösen az olyan nagy felületű és sekély tavakat figyelembe véve, mint a Balaton.

A medencekísérletek során azt tapasztaltuk, hogy a lebegőanyag-tartalom kalibrálásának pontosságát nem befolyásolta az a-klorofill, ill. a huminanyag jelenléte abban a mennyiségben, amiben a Balatonon általában előfordulnak. Ezt a műholdképek elemzése is megerősítette.

A műholdképek vizsgálatai megerősítették az állítást, miszerint a-klorofill-koncentráció közvetlenül nem térképezhető a képi adatokból, még megfelelő előkészítés után sem. Ezért egy új megközelítési módot alkalmaztunk: keverék modell felállítását (mixture modelling). A keverék modell felállításával történő a-klorofill-eloszlás meghatározás pontos módszernek bizonyult a nyílt édesvízre. A többváltozós regressziós analízis során kapott determinációs együttható $r^2=0,95$ volt. A kialakított módszer azonban csak akkor alkalmazható, ha az a-klorofill-koncentráció $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -nél nagyobb.

Az a-klorofill meghatározására legjobbnak mutatkozó kalibrációs egyenlet bizonyította a módszerben rejlő lehetőségeket azzal, hogy változtatás nélkül alkalmazható volt egy korábban készült Landsat felvételre, melynek idején az a-klorofill mennyisége a Keszthelyi-öbölben jóval meghaladta a $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t. A sikeresség leginkább a módszer lényegét adó szélső pont lehatárolásán múlik.

Ezzel a módszerrel hatékonyan lehet a pontszerű hagyományos mintavétellel nyert adatokat nagyobb felületre kiterjeszteni. Összességében szükség van egy kezdeti alaposabb vizsgálatra, ahol meg kell találni az összefüggést a műholdkép és a terepi minták között. Ezt követően kisebb számú terepi minta is elég a rendszeres képfeldolgozáshoz. Az időben feldolgozott képek figyelmeztethetik a környezetvédelmi szakembereket egy induló vízvirágzásra, kijelölhetik a már érintettek területeket.

Irodalom:

Brivio, P. A., Giardino, C., Zilioli, E. 2001, Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, **22(2-3)**, 487-502.

Dekker, A. G., Malthus, T. J., Hoogenboom, H. J. 1995, Remote Sensing of Inland Water Quality. In: *Advances in Environmental Remote Sensing*, Edited by Danson F. M., Plumer S. E., John Wiley & Sons Ltd. Chichester 123-142.

van der Meer, F. 1995, Spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, **16(16)**, 3189-3194.

Gitelson, A., Garbuzov, G., Szilágyi, F., Mittenzwey, K-H., Karnieli, A., Kaiser, A. 1993, Qualitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *International Journal of Remote Sensing*, **14(7)**, 1269-1295.

Han, L., Rundquist, D. C. 1996, Spectral characterization of suspended sediments generated from two texture classes of clay soil. *International Journal of Remote Sensing*, **17(3)**, 643-649.

Lindell T., Pierson D., Premazzi G., Zilioli E. (szerk.) 1999, *Manual for Monitoring European Lakes Using Remote Sensing Techniques*, European Comission Joint Research Centre, Environment Institute, SALMON, Italy (European Communities) (Part III. Remote Sensing of Lakes 81-122)

Quibell G. 1991, The effect of suspended sediment on reflectance from freshwater algae. *International Journal of Remote Sensing*, **12(1)**, 177-182.

Varga Gy., Szilágyi F. 1991. Távérzékelési módszerek hasznosítása a Balaton vízminőségi célú tematikus térképezésében. *MHT IX. Országos vándorgyűlés, Székesfehérvár*, 219-229.

A dolgozat témájában megjelent publikációk jegyzéke:

Sváb E., Tyler A., Preston T., Antal K., Présing M. 2003, Távérzékelés a Balaton vízminőségének felmérésében. *Hidrológiai Közlöny* **83**, 136-138.

Sváb E., Tyler A. N., Preston T., Présing M., V.-Balogh K. 2005, Characterizing the spectral reflectance of algae in lake waters with high suspended sediment concentrations *International Journal of Remote Sensing* **26**, 919-928. IF 0,925

Tyler A.N., Sváb E., Preston T., Présing M., Kovács A.W. 2006, Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing* **27**, 1521-1537. IF 0,980

Előadások:

Sváb E., Tyler A.N., Preston T., Présing M. 2002, Távérzékelés a Balaton vízminőségének felmérésében. *XLIV. Hidrobiológus Napok, Tihany, 2002. október 2-4.*